

УДК 621.384.8

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ ТИПА МИ-1201 ВЫПУСКА ДО 1988 г.

*А.В.Сапрыгин, В.А.Калашников, Ю.Н.Залесов, А.Ю.Ковалев, Н.И.Утев, А.Б.Малеев, Д.В.Новиков,
С.И.Швецов.*

*Уральский электрохимический комбинат
624130, Новоуральск Свердловской обл., Дзержинского, 2
vak@ueir.ru*

В ЦЗЛ УЭХК разработана программа модернизации масс-спектрометров МИ 1201 с выработанным ресурсным сроком эксплуатации. Изготовлен опытный образец модернизированного масс-спектрометра, на котором проведены испытания с целью утверждения типа средства измерения, начаты работы по серийной сборке модернизированных масс-спектрометров. В статье описано содержание работ по модернизации масс-спектрометров и приведены технические характеристики модернизированного масс-спектрометра.

Все возрастающие требования к качеству основной продукции, выпускаемой комбинатом, обуславливают рост требований к точности и надежности проводимых анализов. По этой причине на УЭХК всегда велись работы по совершенствованию аппаратуры и разработки новых методик анализа. Основной парк масс-спектрометров, эксплуатирующихся в настоящее время в ЦЗЛ, составляют масс-спектрометры МИ-1201, МИ-1201В и МИ-1201АГ. Масс-спектрометр МИ-1201АГ представляет собой вполне современный автоматизированный прибор. МИ-1201В были модернизированы и автоматизированы в начале 90-х годов, и поэтому тоже вполне удовлетворяют современным требованиям. Масс-спектрометры МИ-1201 – это наиболее старые приборы, в которых предусмотрен только ручной режим измерений.

Масс-спектрометры МИ-1201 предназначены для дискретного анализа изотопного состава газов. Масс-спектрометры данной модели выпускались заводом "Селми", город Сумы (Украина), в период с 1976 по 1988 гг. К концу девяностых годов в Центральной заводской лаборатории УЭХК имелось большое количество приборов данного типа, полный рабочий ресурс которых был полностью выработан, электроника устарела морально и физически, степень автоматизации из-

мерений не соответствовала современным требованиям, механические узлы изношены. Поэтому в 1998 году было принято решение о проведении модернизации данных масс-спектрометров.

Целью модернизации являлось восстановление и улучшение аналитических характеристик масс-спектрометров МИ-1201 с выработанным ресурсным сроком путем замены в них узлов и схем на новые на основе последних достижений в области масс-спектрометрии и электронной техники. Согласно разработанному техническому заданию, аналитические характеристики модернизированного масс-спектрометра должны были соответствовать техническим характеристикам МИ-1201 АГ [1] или превышать их.

Объектами модернизации стали электронные схемы, система ввода газа в источник ионов, источник ионов и средства откачки. Аналитическая стойка масс-спектрометра, камера анализатора и диспергирующий магнит остались прежними.

К 2001 был собран и испытан макет модернизированного масс-спектрометра, а в течение 2001 были проведены испытания модернизированного масс-спектрометра с целью утверждения типа средства измерения и начаты работы по серийной сборке модернизированных масс-спектрометров.

Содержание работ по модернизации масс-спектрометров МИ-1201

Аналитическая стойка масс-спектрометра претерпела минимальные изменения по сравнению с другими частями прибора. Тем не менее, было произведено изменение системы ввода проб в источник ионов, упрощена электрическая схема стойки, заменены отдельные элементы вакуумной системы [2].

Прежняя система ввода проб была заменена на систему формирования молекулярного пучка, разработанную и испытанную в ЦЗЛ. Правильная работа такой системы ввода требует установки двух высоковакуумных ловушек типа "холодный палец": на первом "пальце", ближнем к устройству ввода пробы, конденсируются отраженные от диафрагмы молекулы, а на втором "пальце" конденсируются молекулы пучка UF_6 после прохождения через ионизационную камеру источника ионов. В связи с установкой двух высоковакуумных ловушек была изменена конструкция камеры источника ионов, в которой были предусмотрены дополнительные фланцы.

Исследования процессов взаимодействия гексафторида урана (ГФУ) с поверхностью капилляра показали, что повышение давления в капилляре до 0,5...1,0 мм.рт.ст. приводит к уменьшению этого взаимодействия и, как следствие, к уменьшению эффекта памяти. Для создания повышенного давления ГФУ в капилляре в конструкции системы ввода было предусмотрено деление потока на две части: через эмиттер – в источник ионов и через регулируемое отверстие в капилляре – непосредственно на "холодный палец". Это осуществляется с помощью клапана давления, управляемого микровинтом. Для реализации нового способа ввода газа в ионизационную камеру, необходимо было изменить, также, конструкцию источника ионов. Крепление ионизационной камеры, блока вытягивающих и фокусирующих линз было изменено таким образом, чтобы обеспечить свободное прохождение молекулярного пучка через ионизационную камеру. В измененной конструкции ионизационная камера установлена на двух керамических стойках непосредственно на стекле корпуса, блок вытягивающих и фокусирующих линз с помощью керамических стоек крепится к плате коллимирующих щелей, а сама плата на четырех металлических стойках закреплена также на стекле корпуса источника.

В отличие от прежней конструкции камеры источника ионов, в которой формирование пучка электронов осуществлялось при помощи мас-

сивного электромагнита, в новой конструкции применяются постоянные магниты, позволяющие упростить и облегчить юстировку. Конструкция крепления магнитов предусматривает их плавное перемещение по двум координатам относительно ионизационной камеры. Постоянные магниты были изготовлены из сплава "неодим-бор-железо".

Модернизация электрической схемы аналитической стойки предусматривает полную замену кросса внутри стойки, что обусловлено возможностью значительного упрощения схемы.

Модернизация вакуумной схемы аналитической стойки масс-спектрометра заключается в замене диффузионных насосов высоковакуумной откачки на магниторазрядные насосы типа НМД-0,16. Такая замена повышает надежность вакуумной системы, позволяет на порядок улучшить вакуум и, в то же время, дает возможность исключить использование в работе ртути, снизить энергопотребление и полностью отказаться от заливки жидкого азота в штатные высоковакуумные ловушки.

Новая система напуска модернизированного масс-спектрометра ориентирована на работу в составе масс-спектрометра, на котором проводятся анализы изотопного состава урана в ГФУ, отбираемого для анализа непосредственно из технологических потоков.

Система напуска предназначена для подготовки и последовательного ввода в источник ионов масс-спектрометра пробы ГФУ неизвестного изотопного состава (пробы) и стандартного образца (СО) ГФУ известного изотопного состава, как в автоматическом, так и в ручном режимах.

Конструктивно система напуска состоит из двух основных элементов, каждый из которых имеет свое функциональное назначение: стенда подготовки и ввода проб и системы отбора проб. Стенд подготовки и ввода проб изготовлен в виде отдельной стойки, устанавливаемой рядом с аналитической, а система отбора проб выполнена в виде панели на П-образной раме, которая устанавливается на аналитическую стойку.

Стенд подготовки и ввода проб включает в себя устройства и коммуникации, необходимые для подготовки и напуска проб ГФУ или стандартных образцов в источник ионов масс-спектрометра, для присоединения отборников с пробой и стандартными образцами. Кроме того, на стенде подготовки и ввода проб установлены две форвакуумные ловушки, поглотительная колонка, форвакуумный насос, магниторазрядный насос, пять стрелочных манометров и датчик для измерения

форвакуума.

Система отбора проб предназначена для автоматического отбора проб ГФУ из технологических линий и включает в себя клапаны запорные, электромагнитные клапаны, стрелочные манометры и ресиверы.

В качестве устройства ввода ГФУ в источник ионов может быть использован восьмиклапанный натекатель или система из семи одиночных накателей игольчатого типа.

Коренным образом была переработана электроника масс-спектрометра. Силами персонала ЦЗЛ были разработаны схемы следующих электронных блоков: блока стабилизации индукции магнитного диспергирующего поля, блока питания источника ионов, блока управления клапанами, блока регистрации масс, усилителя ионного тока и формирователя импульсов тока магнита анализатора.

Канал питания электромагнита предназначен для питания обмотки электромагнита анализатора током, обеспечивающим в межполюсном зазоре электромагнита стабильную индукцию, или индукцию, изменяемую по заранее заданной программе.

В модернизированном масс-спектрометре канал питания электромагнита функционально состоит из следующих узлов: блока питания магнита, формирователя импульсов тока, блока стабилизации индукции, генератора цифровой развертки и схемы автоподстройки луча. Обмотки магнита анализатора включены последовательно, а их общее активное сопротивление равно 10,5 Ом. Блок питания магнита формирует напряжение питания магнита + 56 В. Регулирующим элементом в цепи питания электромагнита является блок формирователя импульсов тока, выполненный по схеме с широтно импульсной модуляцией с ключевыми элементами на составных транзисторах. Стабилизация магнитного поля в зазоре магнита анализатора осуществляется с помощью блока стабилизации индукции. Основным элементом данного блока является интегрирующий усилитель, выполненный на сверхстабильном операционном усилителе МДМ-типа КР140УД24. Корпус микросхемы помещен в активный термостат, что обеспечивает высокую стабильность работы схемы. Подобная схема канала стабилизации обеспечивает высокую стабильность индукции магнита анализатора, с верхним пределом диапазона массовых чисел более 350 а.е.м. при величине ускоряющего напряжения 5 кВ.

Управление током магнита анализатора осу-

ществляется как вручную с помощью кнопок на передней панели блока стабилизации индукции, так и от компьютера, с помощью схемы генератора цифровой развертки. Управление генератором цифровой развертки производится с помощью компьютера через контроллер развертки и регистрации.

Функция автоподстройки, предназначенная для удержания луча в щели приемника при длительных прецизионных измерениях в статическом режиме, компенсирует дрейф магнитного поля путем соответствующего воздействия на магнитную индукцию анализатора. В модернизированном масс-спектрометре данная функция может выполняться либо программно, с помощью процедуры настройки на центр пика, либо с помощью схемы автоподстройки. Принцип работы схемы автоподстройки заключается в использовании дополнительного коллектора приемника ионов, который настраивается на склон дополнительного луча, причем интенсивность сигнала от пика на выходе усилителя постоянного тока (УПТ) основного коллектора должна быть равна интенсивности сигнала на выходе УПТ дополнительного коллектора на склоне пика. Полярность разности (склон левый, склон правый) подбирается такой, чтобы при воздействии на вход интегрирующего усилителя стабилизатора развертки, эта разность сводилась к нулю.

Канал питания источника ионов предназначен для формирования напряжений, питающих ионную оптику источника, и стабилизации тока эмиссии катода в источнике ионов. В модернизированном масс-спектрометре канал питания источника включает в себя блок ускоряющего напряжения, блок питания источника ионов и блок настройки.

Блок ускоряющего напряжения выполнен по схеме блока масс-спектрометра МИ-1201В. В данной схеме стабилизатор ускоряющего напряжения выполнен по схеме линейного стабилизатора параллельного типа с регулирующим элементом на лампе 6Э15П. Блок питания источника ионов был разработан специалистами ЦЗЛ, и включает в себя стабилизаторы напряжений электродов источника ионов и стабилизатор тока эмиссии катода источника ионов. Стабилизатор тока эмиссии выполнен по схеме двухтактного широтно-импульсного модулятора с выходным трансформаторным преобразователем. Блок настройки представляет собой делитель напряжения и формирует напряжения для ионной оптики источника ионов.

Канал регистрации ионного тока предназна-

чен для преобразования ионных токов, возникающих в анализаторе масс-спектрометра, в напряжение, а затем в частоту следования импульсов. Диапазон регистрируемых токов от 10^{-14} до 10^{-9} А. Функционально канал состоит из двух устройств: электрометрического усилителя и блока регистрации масс.

Электрометрический усилитель предназначен для преобразования ионных токов коллекторов ионов в напряжение и имеет три идентичных канала преобразования, выполненных на специализированном операционном усилителе AD549L. Блок регистрации масс предназначен для преобразования напряжения на выходе электрометрических усилителей в частоту следования импульсов, и формирования питающих напряжений для электрометрического усилителя. Частотные сигналы, пройдя через гальваническую развязку, выполненную на оптронах, с помощью интерфейсной платы контроллера регистрации преобразуются в код и считываются персональной ЭВМ.

Канал индикации вакуума включает индикацию высокого вакуума и индикацию форвакуума. Обе схемы индикации взяты от масс-спектрометра МИ-1201 без изменений. Измерение давления в линии форвакуума осуществляется с помощью датчика ПМТ-4. Измерение давления высокого вакуума, как в области источника ионов, так и в области приемника ионов, осуществляется с помощью магнито-ионизационных датчиков. Схема измерения высокого вакуума выполняет также функцию релейной защиты блоков канала питания источника ионов по вакууму.

Управление электромагнитными клапанами системы напуска масс-спектрометра осуществляется с помощью блока управления клапанами. Управление производится как вручную с помощью кнопок на передней панели блока, так и от компьютера с помощью интерфейсной платы управления. Кроме того, блок осуществляет функцию блокировки одновременного включения клапанов системы откачки.

Каждый масс-спектрометр оснащается персональным компьютером с двумя интерфейсными платами: контроллером управления и контроллером развертки и регистрации. Контроллер управления осуществляет управление клапанами системы напуска, а с помощью контроллера развертки и регистрации осуществляется управление магнитом анализатора и регистрация сигналов на выходе каналов регистрации ионных токов.

Программное обеспечение, разработанное для модернизированного масс-спектрометра позво-

ляет решать следующие задачи:

- выполнение процедур настройки и калибровки измерительной аппаратуры масс-спектрометра, юстировки магнита, отбора и подготовки проб;
- автоматический анализ изотопного состава гексафторида урана в газовой фазе по требованию оператора или по графику круглосуточной работы;
- автоматическое выполнение операций, связанных с использованием масс-спектрометра в линии АСУТС разделительного производства (контроль давлений в технологических трассах, выравнивание давлений стандартных образцов и пробы);
- передачу результатов измерений в базу данных по сети, математическая обработка данных и формирование итоговых документов.

Результаты определения технических характеристик модернизированного масс-спектрометра

В результате выполнения всего комплекса работ по модернизации был изготовлен первый опытный образец модернизированного масс-спектрометра. В течение года был проведен ряд испытаний, в том числе и испытания для целей утверждения типа средства измерения, в результате которых были подтверждены все указанные в эксплуатационной документации технические характеристики масс-спектрометра, а именно:

- верхний предел диапазона массовых чисел при ускоряющем напряжении 5 кВ составляет не менее 350 а.е.м.;
- разрешающая способность масс-спектрометра по урану, измеренная на уровне 10 % высоты пиков (интенсивности линий) масс-спектра, не менее 1100;
- изотопический порог чувствительности по урану не более 10 ppm;
- предел допускаемого значения среднего квадратического отклонения (в дальнейшем СКО) случайной составляющей относительной погрешности масс-спектрометра при измерении изотопных отношений уран-235/уран-238 в ГФУ с естественным содержанием изотопов двухлучевым методом – 0,02 %;
- фактор памяти по ГФУ в рабочих условиях не превышает 1,01;
- относительная нестабильность интенсивности сигнала на середине склона пика урана-238 составляет не более $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ за 20 мин.

Ниже приведены результаты определения вышеперечисленных технических характеристик, полученных при проведении испытаний для це-

лей утверждения типа средства измерения.

Определение верхнего предела диапазона массовых чисел проводили в следующей последовательности. Ввели в источник ионов ГСО 7521-99. С помощью программного обеспечения провели градуировку шкалы масс для второго коллектора по пикам с массовыми числами $M_1 = 20$ и $M_2 = 333$ а.е.м. Установили значение магнитного поля в зазоре электромагнита анализатора, при котором ионы с массой 333 а.е.м. принимаются на второй коллектор. Выполнили процедуру настройки на центр пика.

С помощью процедуры "Установка заданной массы" установили значение магнитного поля, соответствующее массовому числу 350. С помощью процедуры "Установка заданной массы" установили значение магнитного поля, при котором ток ионов с массовым числом 333 принимается на второй коллектор приемника ионов. Выполнили процедуру настройки на центр пика. В результате выполнения процедуры получили значение массового числа, равное $M_3 = 332,5$. Рассчитали погрешность установки $|M_3 - M_2| = 0,5$. Максимальное значение разности массовых чисел не должно превышать 1.

Определение разрешающей способности масс-спектрометра по урану проводили в следующей последовательности. Классическим образом разрешающая способность масс-спектрометра по урану определяется [3] по спектрограмме, на которой записаны 2 пика, соответствующие массам M_1 и M_2 и рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{M_{\text{ср}} \cdot L}{H_{\text{ср}} \cdot \Delta M}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое из массовых чисел M_1 и M_2 а.е.м.; L – расстояние между пиками на спектрограмме в мм; $H_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое из ширин пиков H_1 и H_2 , измеренных на уровне 10 % высоты, мм; ΔM – разность массовых чисел M_1 и M_2 , а.е.м.

При реализации такого алгоритма расчета разрешающей способности программным путем $L = \Delta M$, т.к. в этом случае расстояние между пиками измеряется в а.е.м. Следовательно, формула (1) преобразуется в:

$$R = \frac{M}{H}. \quad (2)$$

Таким образом, для определения разрешающей способности масс-спектрометра по урану с помощью процедуры программного обеспечения достаточно записать пик с массовым числом $M = 333$ и измерить его ширину H на уровне 10 % высоты пика.

В идеальном случае ширина ионного пучка должна быть равна ширине принимающего этот ионный луч коллектора. В реальных условиях трудно соблюсти это требование, но можно его учесть математически. Для этого из полной ширины пика, измеренной на уровне 10 % пика ($H_{10\%}$), следует вычесть ширину плоской части вершины пика, экспериментально определенную, как ширину пика на уровне 99,8 % $H_{99,8\%}$. Таким образом, величина H в формуле (2) рассчитывается как разность:

$$H = H_{10\%} - H_{99,8\%} \quad (3)$$

Полученная в результате измерения разрешающей способности спектрограмма приведена на рис. 1. Значение разрешающей способности на уровне 10 % высоты пика составило 1677.

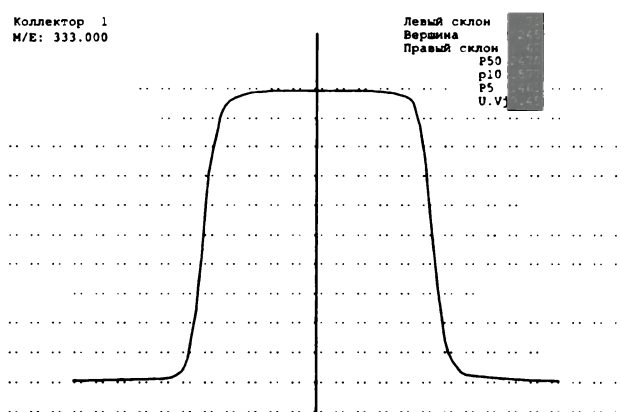


Рис. 1. Спектрограмма для определения разрешающей способности масс-спектрометра по урану

Определение изотопического порога чувствительности по урану проводили в следующей последовательности. Изотопический порог чувствительности по урану определяют как величину вклада тока рассеянных ионов с отношением массы к заряду $m/q = 333$ в ток ионов с $m/q = 331$ по отношению к току ионов с $m/q = 333$:

$$\Delta = \frac{I_{331 \text{ рассеянных}}}{I_{333}}. \quad (4)$$

Поскольку нижняя и верхняя границы динамического диапазона УИТ составляют соответственно 0 и -9 В, а декларируемая величина изотопического порога чувствительности по урану составляет 10 ppm, то ожидаемая интенсивность сигнала от рассеянных ионов не должна превышать 0,09 мВ в том случае, если пики с массами 331 и 333 будут записаны на одном коллекторе. Однако, такая величина сигнала сопоставима с уровнем шумов УИТ. В силу этого обстоятельства был предложен альтернативный вари-

ант определения изотопического порога чувствительности по урану. Был записан масс-спектр (рис. 2) урана с естественным содержанием изотопов на "чувствительном" коллекторе (коллектор, подключенный к каналу регистрации с более высоким коэффициентом усиления).

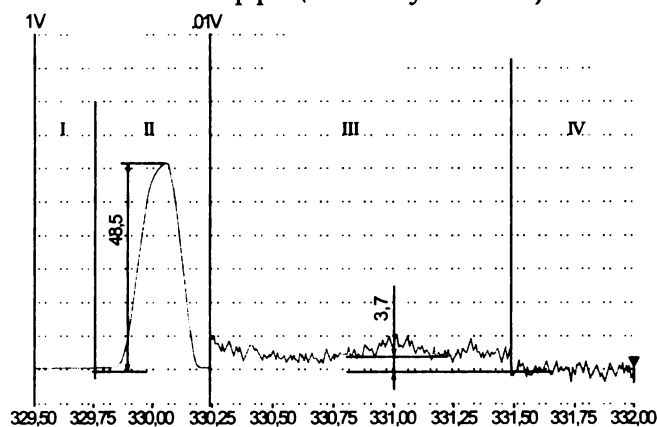


Рис.2. Масс-спектр для определения изотопического порога чувствительности по урану

Отношение уран-238/уран-235 в таком стандартном образце изотопного состава урана известно и равно 138. Следовательно, измерив интенсивность (высоту пика на масс-спектре) тока ионов с $m/q = 330$, можно вычислить величину интенсивности тока ионов с $m/q = 333$. Тогда выражение (4) приобретает вид:

$$\Delta = \frac{I_{331 \text{ рассеянных}}}{I_{330} \cdot 138} \quad (5)$$

На рис. 2 отмечены следующие четыре участка:

I - нулевой уровень на шкале записи, равной 1 В;
II - пик урана-235 на шкале записи, равной 1 В;
III - "хвост" от пика урана-238 и пик изотопа урана-236 (величина данного пика при расчете не учитывается) на шкале записи, равной 0,01 В;
IV - нулевой уровень УПТ-1 на шкале записи, равной 0,01 В.

Из спектра величина подкладки на месте пика урана-236 равна 3,7 мм, высота пика урана-235 равна 48,5 мм. Приведенная величина пика урана-238 равна $(48,5 \cdot 138)$.

Тогда изотопический порог чувствительности равен:

$$\Delta = \frac{3,7 \cdot 0,01}{48,5 \cdot 1 \cdot 138} = 5,5 \text{ ppm} < 10 \text{ ppm} \quad (6)$$

Определение предела допускаемого значения СКО случайной составляющей относительной погрешности масс-спектрометра при измерении изотопных отношений уран-235/уран-238 в ГФУ с естественным содержанием изотопов двухлучевым методом проводили следующим

образом. В качестве исходных данных для расчета СКО был взят массив из 20 значений атомных долей урана-235, полученных в результате измерения ГСО 7521-99 относительным двухлучевым методом [4] (см.таблицу).

Массив результатов измерений атомной доли урана-235 в ГСО 7521-99 для расчета СКО ($C_{\text{паспрт.}} = 0,71951\%$)

№ пп.	Измеренное значение атомной доли урана-235, %
1	0,719613
2	0,719619
3	0,719626
4	0,719642
5	0,719649
6	0,71968
7	0,719703
8	0,719711
9	0,719720
10	0,719733
11	0,719736
12	0,719739
13	0,719744
14	0,719850
15	0,719866
16	0,719874
17	0,719885
18	0,719921
19	0,719925
20	0,719932

Для расчета СКО воспользовались стандартной формулой:

$$S_R = \frac{1}{\bar{x}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Полученное значение СКО случайной составляющей относительной погрешности составляет 0,0152 %, что не превышает паспортного значения, равного 0,02 %.

Определение фактора памяти по ГФУ проводили в соответствии с методикой, изложенной в [4]. Как отмечалось выше, фактор памяти по урану удалось существенно уменьшить, установив систему молекулярного ввода анализируемого газа в источник ионов. Если при прежнем варианте ввода газа в источник ионов (через капилляр из меди параллельно оптической оси анализатора) минимальное значение фактора памяти составляло 1,02, то для модернизированного масс-

спектрометра максимальное значение этого параметра не превышает 1,01. Измерение фактора памяти проводили при помощи стандартной процедуры программного обеспечения. В измерении участвовали 2 стандартных образца изотопного состава урана: ГСО 7521-99 с атомной долей урана-235 0,71978 % и ГСО 7522-99 с атомной долей урана-235 0,835 %. Результаты измерений показали, что значение коэффициента памяти для данных ГСО составляет от 1,003 до 1,008.

Определение относительной нестабильности интенсивности сигнала на середине склона пика урана-238 проводили в следующей последовательности. Полученный масс-спектр и необходимые построения для расчета относительной нестабильности интенсивности сигнала на середине склона пика урана-238 приведены на рис.3.

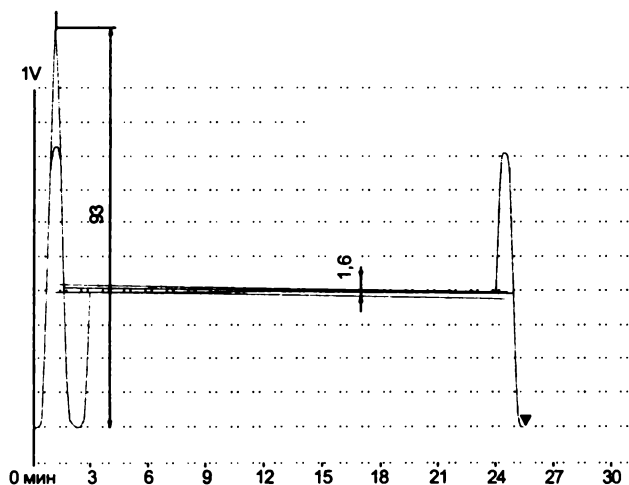


Рис.3. Спектрограмма для определения нестабильности интенсивности сигнала на середине склона пика урана-238

В режиме развертки по массам произвели запись пика с массовым числом 333 в сторону увеличения масс и установили луч на середине склона пика со стороны больших масс. В режиме раз-

вертки по времени записали нестабильность измеряемого сигнала в течение 20 мин. В режиме развертки по массам произвели запись пика с массовым числом 333 в сторону уменьшения масс, пройдя через максимум пика до нулевого уровня. На полученном масс-спектре соединили прямой линией точки на половине максимальной высоты пиков в начале и в конце записи, параллельно этой линии провели прямые через точки максимального и минимального отклонения за время записи нестабильности. Измерили разность h между минимальным и максимальным значениями сигнала и высоту H пика с массовым числом 333. Высоту пика определили как высоту точки пересечения прямых, являющихся продолжением линий склонов пика. Рассчитали нестабильность интенсивности сигнала N с учетом разрешающей способности R по формуле:

$$N = \frac{h}{2 \cdot H \cdot R} \quad (8)$$

где h – разность между минимальным и максимальными значениями сигнала на склоне пика, мм; H – интерполированная высота пика, мм; R – разрешающая способность;

В результате выполненных измерений по рис. 4 получаем: $H=93$ мм, $h=1,6$ мм. Ранее определенная величина разрешающей способности, $A=1677$.

Тогда значение нестабильности вычисляется по формуле:

$$N = \frac{h}{H \cdot 2 \cdot R} = \frac{1,6}{93 \cdot 2 \cdot 1677} = 5,1 \cdot 10^{-6} < 2 \cdot 10^{-5}$$

Таким образом, в ходе испытаний были подтверждены все паспортные значения технических характеристик модернизированного масс-спектрометра.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.3.394.044 ТО. Масс-спектрометр МИ-1201АГ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Сумы (Украина): "Селми", 1990. 158 с.
- 2.еК3.394.001 РЭ. Масс-спектрометр МС-М. Руководство по эксплуатации. Новоуральск: УЭХК, 2002. 67 с.
- 3.Сысоев А.А. Изотопная масс-спектрометрия/

- А.А.Сысоев, В.Б.Артаев, В.В.Кашеев М.: Энергоатомиздат, 1993. 287 с.
- 4.ОИ 001.477-99. Урана гексафторид. Методика масс-спектрометрического определения изотопного состава в газовой фазе. Новоуральск: УЭХК, 2000. 49 с.

* * * * *

MODERNIZATION OF MI-1201 MASS-SPECTROMETER PRODUCED BEFORE 1988

A.V.Saprygin, V.A.Kalashnikov, Yu.N.Zalesov, A.Yu.Kovalev, N.I.Utev, A.B.Maleyev, D.V.Novikov, S.I.Shvetsov

The program of modernization was developed in Analytical Centre of UEIP for mass-spectrometers MI-1201 with worked-out resort term. The production prototype of streamlined mass-spectrometer has been making, it has pass test with the purpose the approval type of measuring tool, and now the repetition work is carried out. In article the substance of work on modernization mass-spectrometers and the results of measurement of product specification is given.